

超微細半導体集積回路製造用反応性イオンエッチングに関する研究

著者	佐藤 政明
号	1704
発行年	1996
URL	http://hdl.handle.net/10097/10511

氏 名	佐 藤 政 明
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学 位 授 与 年 月 日	平 成 8 年 9 月 11 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 51 年 3 月 東北大学工学部電子工学科卒業
学 位 論 文 題 目	超微細半導体集積回路製造用反応性イオンエッチングに関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 室田 淳一 東北大学教授 佐藤 徳芳 東北大学教授 大見 忠弘

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 序 論

シリコンLSIなどの半導体集積回路の製造においては、デバイスのパターンを半導体ウエハ表面に形成するために、フォトリソグラフィなどのパターン転写により形成したレジストパターンをマスクにして下地材料をエッチングする技術が必要不可欠である。集積回路の高集積化・高性能化を図るためには、パターン寸法のより一層の微細化が必要である。薄膜等の方向性エッチングを行う反応性イオンエッチング(Reactive Ion Etching: RIE)の分野では、表面汚染・素子損傷を起こさずに微細加工形状を実現するため、反応室内の反応種やそのガス圧、イオン種やそのエネルギーといった多次元にわたる条件を制御すること、また、気相や表面での反応の過程を明確化した上で加工対象の材料に適したガス系と加工条件を選択することが大きな課題である。

本研究では、表面での反応の精密制御の観点から、高プラズマ密度下でイオンエネルギーの独立制御と高速均一エッチングができる装置を開発し、化学反応制御によるエッチング残渣除去法並びに表面汚染防止法を提案した。さらに表面でのエッチングガスによるエッチングと堆積の化学反応の競合に着目し、エッチング対象材料に適したSi系側壁保護膜形成の反応系の構築を行い、微細加工形状と選択性の制御を可能にすると同時に、塩素系ガスでのドライエッチングの反応過程をモデル化した。

第 2 章 反応性イオンエッチング装置

本章では、反応性イオンエッチング装置として用いられてきた高周波二極型RIE装置の限界を検討し、その改良として三極型RIE装置を開発した結果を述べた。

高周波二極型RIE装置では、電力の増加、ガス圧の低下とともに試料に入射するイオンエネルギーが増加するためプラズマ密度とイオンエネルギーを独立に制御できないことを明らかにした。そして、このことがエッチングの高制御性の障害となることを指摘した。

上記の問題の解決のため三極型RIE装置として、グリッドで隔てられ分離された放電室を設けた放電室分離型RIE装置を開発し、プラズマ密度が通常のRIEに比べ実用域で3から4倍の条件でイオンエネルギーの独立制御を実現した。

さらにエッチング速度の向上を図るため、マグネトロン放電を用いて高プラズマ密度にしつつ磁場を時間的に動かさずにエッチング均一性を確保できる磁場印加法を考案し、静磁場マグネトロン三極型RIE装置を開発し、加工精度の向上とチャージアップダメージの防止を実現した。

第3章 気相・表面化学反応制御による表面汚染の低減

本章では、反応性イオンエッチングにおける表面汚染の防止とエッチング残渣の除去がエッチングガスの選択による化学反応の適切な制御により可能であることを明らかにした。

ガスからの汚染防止法として、Al膜を CCl_4 ガスでエッチングする場合のカーボン汚染を取り上げ、 CCl_4 に N_2 を混合しCNを形成することが有効であることを見いだした。さらに、エッチングガスにカーボンを含まない SiCl_4 を用い、異方性に優れた高選択なAl膜加工が可能であることを明らかにした。

エッチング材料の残渣除去法として、AlCu合金膜エッチング後の塩化銅残渣を取り上げ、塩化アルミニウムをガス中へ添加し塩化銅の揮発を促進させるエッチング方法を提案した。塩化銅の揮発は、塩化銅と塩化アルミニウムとが反応し、四面体構造で安定であるクロロアルミネート銅($\text{AlCl}_4\text{-Cu-AlCl}_4$)が生成したためとして説明した。

装置構成材料からの汚染防止法として、高純度化の進んだガスと配管材料の使用で問題となった Cl_2 による多結晶Siエッチングにおける塩素とアルマイトチャンバの反応によるAl汚染を取り上げ、気相中での酸素ラジカルの有無により塩素と酸化アルミニウムの反応の平衡定数が K_p 《1から K_p 》1に変化することに着目し、微量の酸素添加によりAl汚染を防止できることを明らかにし、エッチングガスと装置構成材料の反応を抑えるための化学反応の制御が有効であることを示した。

第4章 シリコン系側壁保護膜による加工形状制御

本章では、反応性イオンエッチングにおける加工形状制御に必要な側壁保護膜としてSi系材料を応用するため、ガスとして SiCl_4 を取り上げた。 SiCl_4 はプラズマ中で分解することによりエッチング種であるClラジカルと堆積種であるSiラジカルを生成する。したがって、 SiCl_4 ガスはエッチングガスとしてだけでなく、他のエッチングガスとの混合により側壁保護膜形成用ガスとして適用できる。

SiCl_4 単体をエッチングガスとしてAl膜加工に適用した場合の分解反応種を同定し、放電中での電子衝突による1次反応により生じたClラジカルによるエッチングと2次反応により生じたSiラジカルによる側壁保護膜堆積が共存していることを見だし、これらのラジカル比がエッチングの異方性を決めていることを明らかにした。

単結晶Siへの素子間分離用溝エッチングにおいては、 Cl_2 をエッチングガスとし SiCl_4 と H_2 を保護膜形成用として混合しシリコン系の薄膜で側壁を保護することにより順テーパで底面の平坦な加工を実現し、エッチングガスとは独立に側壁保護膜堆積用ガスを添加する方法がきわめて有効であることを示した。さらに、Si溝エッチングにおいて加工形状を維持しながらエッチング選択比とエッチレートの向上を図るため、放電室分離型RIE装置を用いてイオンエネルギーと独立にプラズマ密度を上昇させかつ Cl_2 に SiCl_4 を混合することにより、選択比やエッチレートを低下させずに側壁保護が可能となり、高アスペクト比の溝加工を実現した。そして、この特性が得られるのは、プラズマ密度の上昇によりガスの分解が促進し、エッチング種濃度が減少せずに堆積種が増加したことによるとして説明した。

反応生成物の側壁保護への役割を、 n^+ 型多結晶Siとゲート絶縁膜の境界が異常にサイドエッチングされる現象を例にして議論し、オーバエッチング時の反応生成物の減少により、側壁保護膜が境界近くで堆積されないためとして説明した。そして O_2 と SiCl_4 をオーバエッチング時に添加し酸化シリコン系被膜を側壁と下地 SiO_2 膜上に選択成長させることにより、異常サイドエッチングの防止のみならず SiO_2 膜とほぼ無限大の選択比を実現した。

第5章 塩素系ドライエッチングにおけるエッチング機構

本章では、塩素および塩素系化合物をエッチングガスとして用いたドライエッチングに関して、実用的ドライエッチング装置で得られたエッチング特性から反応モデルを構築し、そのエッチング機構を明らかにした結果を述べた。

まずはじめに、ディープサブミクロンSi溝エッチングにおけるパターン幅依存性から、エッチング種としての塩素と弗素の違いを明らかにし、パターン幅の減少にともなうエッチング深さの低下を溝内でのエッチング種濃度の低下によるものとして、また塩素系ガスの方が弗素系に比べパターン幅依存の少ない加工が可能なのは、エッチレートのエッチング種濃度依存性が小さいことによるとして説明した。

次に、中性塩素原子(Clラジカル)による n^+ 型多結晶Siの室温での自発エッチングについて n 型不純物の活性化とエッチレートの関係を調べ、砒素添加多結晶Siのアニール条件とエッチレートの関係から、 n 型不純物の活性化により反応

が促進されることを明らかにした。

さらに、低温化と低ガス圧化により自発反応が無視できる場合の Cl_2 によるイオン支援エッチングレートにも高濃度不純物添加依存性があり、その原因は主に不純物種により化学スパッタ率が異なりn型がp型より大きいことによることを明らかにした。

第6章 結 論

本章では、本論文を要約し、主な成果をまとめ、超微細半導体集積回路の高集積化・高性能化のための反応性イオンエッチングに関するいくつかの重要な知見を明らかにした。

審 査 結 果 の 要 旨

Si集積回路の大容量化・高速化に伴い、集積回路を構成する素子・配線寸法のより一層の微細化が必要とされている。薄膜等の方向性エッチングを行う反応性イオンエッチング（RIE）の分野では、表面汚染・素子損傷を起こさずに微細加工形状を実現するために、反応室内の反応種やそのガス圧、イオン種やそのエネルギー等を加工対象材料に適した条件で精密に制御することが大きな課題になっている。著者は、表面での反応の精密制御の視点から、RIE装置を開発し、化学反応制御による表面汚染防止を提案し、集積回路構成材料の高精度微細エッチングを研究した。本論文は、これらの成果をまとめたもので全文6章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、グリッドで隔てられた放電室分離型RIE装置並びに高プラズマ密度下でエッチング均一性が確保できる静磁場マグネトロン三極型RIE装置を開発し、プラズマ密度とイオンエネルギーの独立制御と高速均一エッチングを可能にした結果を述べている。これは実用上きわめて重要な成果である。

第3章では、表面汚染の防止に関して、ガスからのカーボン汚染のない SiCl_4 によるエッチング法を提案し、AlCu合金膜エッチング後の塩化銅残渣の除去には塩化アルミニウム添加による塩化銅の揮発促進、反応室構成材料からのAl汚染防止には微量酸素添加による酸化アルミニウムの形成が有効であることを明らかにしている。

第4章では、加工形状制御のために、エッチングと堆積の化学反応の競合に着目し、 SiCl_4 を用いて、エッチング対象材料に適したSi系側壁保護膜形成条件を見だし、Al膜・単結晶Si・多結晶Si膜のディープサブミクロンパターン垂直加工を実現している。これは素子の微細化にとって有用な成果である。

第5章では、Siのエッチング機構に関して、エッチング種としての塩素と弗素の違いや、エッチングへの中性ラジカルとイオンの寄与及びSi中の不純物の寄与を定量的に分離し、反応モデルを構築することにより、将来のより一層の微細加工の展望を切り開いている。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、超微細半導体集積回路製造用反応性イオンエッチング装置を開発し、ディープサブミクロンパターン垂直加工技術の確立に貢献するところが大きく、半導体電子工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。